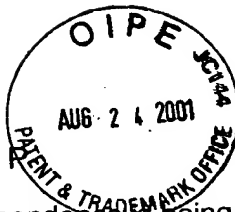


tie

Docket No.: EHF 2001,0167



#6  
0400 08-24-01

I hereby certify that this correspondence is being deposited with the United States Postal Service as First Class Mail in an envelope addressed to the Assistant Commissioner for Patents, Washington, D.C. 20231, on the date indicated below.

By: Markus Nollf Date: August 21, 2001

IN THE UNITED STATES PATENT AND TRADEMARK OFFICE

Applicant : Norbert Benesch et al.  
Applic. No. : 09/873,230  
Filed : June 4, 2001  
Title : Method and Device for Optically Monitoring Fabrication  
Processes of Finely Structured Surfaces in a Semiconductor  
Production

**CLAIM FOR PRIORITY**

Hon. Commissioner of Patents and Trademarks,  
Washington, D.C. 20231

Sir:

Claim is hereby made for a right of priority under Title 35, U.S. Code, Section 119, based upon the German Patent Applications 198 55 983.6, filed December 4, 1998 and 199 22 614.8, filed May 17, 1999.

A certified copy of the above-mentioned foreign patent application is being submitted herewith.

Respectfully submitted,

Markus Nollf  
For Applicants

MARKUS NOLFF  
REG. NO. 37,006

Date: August 21, 2001

Lerner and Greenberg, P.A.  
Post Office Box 2480  
Hollywood, FL 33022-2480  
Tel: (954) 925-1100  
Fax: (954) 925-1101

/kf



**Prioritätsbescheinigung über die Einreichung  
einer Patentanmeldung**

<b>Aktenzeichen:</b>	199 22 614.8
<b>Anmeldetag:</b>	17. Mai 1999
<b>Anmelder/Inhaber:</b>	Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung eV, München/DE
<b>Bezeichnung:</b>	Verfahren und Vorrichtung zur optischen Kontrolle von Fertigungsprozessen feinstrukturierter Ober- flächen in der Halbleiterfertigung
<b>Priorität:</b>	04.12.1998 DE 198 55 983.6
<b>IPC:</b>	H 01 L, G 01 B, G 01 N

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ur-  
sprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 21. Juni 2001  
Deutsches Patent- und Markenamt  
Der Präsident  
Im Auftrag

Faust

A 9161  
06/00  
EDV-L

**CERTIFIED COPY OF  
PRIORITY DOCUMENT**

**Verfahren und Vorrichtung zur optischen Kontrolle von Fertigungsprozessen  
feinstrukturierter Oberflächen in der Halbleiterfertigung**

- 5 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur optischen Kontrolle von Fertigungsprozessen feinstrukturierter Oberflächen in der Halbleiterfertigung sowie eine Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens. Dabei wird zur Analyse von Beugungsbildern der zu untersuchenden Oberfläche ein Vergleich mit bereits vorhandenen Beugungsbildern geprüfter Strukturen durchgeführt.

10

Speziell bei der Halbleiterfertigung müssen während des Fertigungsprozesses häufig Linienbreiten und -profile von strukturierten Schichten kontrolliert werden. Für die Funktionsfähigkeit des Produkts ist die exakte Einhaltung der Spezifikationen für die Linienbreite von ausschlaggebender Bedeutung. Daneben sind noch weitere

- 15 Strukturparameter wie z. B. Grabentiefe oder Seitenschräge von großer Wichtigkeit. Zur Kontrolle dieser Fertigungsparameter auf Lithographiemasken, Halbleiterscheiben oder anderen feinstrukturierten Oberflächen sind geeignete Meßgeräte erforderlich.

Bei den heute verwendeten kleinsten Strukturbreiten im Bereich von 0,25 µm sind konventionelle, zerstörungsfreie optische Linienbreitenmeßgeräte aufgrund von Beugungs-

- 20 und Interferenzeffekten nicht mehr einsetzbar. Um mit möglichst wenigen Monitorscheiben auszukommen, benötigt man bei der Halbleiterfertigung kostengünstige Meßverfahren zur zerstörungs- und kontaminationsfreien Überprüfung von Linienstrukturen auf

Produktscheiben. Die Meßgeschwindigkeit sollte dabei so hoch sein, daß z.B. nach einem kritischen Prozeßschritt jede Produktscheibe ohne signifikante Erhöhung der Prozeßzeit

- 25 kontrolliert werden kann.

### Stand der Technik

- Für die Linienbreitenmessung feiner Strukturen ( $< 1 \mu\text{m}$ ) werden zur Zeit Elektronenmikroskope eingesetzt, die eine aufwendige Handhabung erfordern und einen niedrigen Durchsatz besitzen, so daß nur ein geringer Anteil der prozessierten Halbleiterscheiben überprüft werden kann. Darüber hinaus erhält man exakte Meßergebnisse für die Linienprofile nur mit sogenannten cross-section-Aufnahmen, für die eine bereits prozessierte Halbleiterscheibe zerstört werden muß. Neben den regulären Produktscheiben werden daher bei der Halbleiterfertigung sogenannte Monitorscheibe mitprozessiert, die anschließend für Meßzwecke verwendet werden. Vor allem bei den künftigen großen Scheibendurchmessern von 300 mm und darüber, verursachen diese Monitorscheiben hohe Kosten, zum einen aufgrund des reinen Materialwertes, zum anderen, weil durch sie der Durchsatz an Produktscheiben deutlich reduziert wird.
- Einen Lösungsansatz bietet die Streulichtmessung. Im allgemeinen wird bei diesem Verfahren der zu untersuchende Meßbereich beleuchtet und aus den Merkmalen des reflektierten Lichts auf die Oberflächeneigenschaften des Meßbereichs geschlossen. Befinden sich auf dem Substrat periodische Strukturen, so treten bei entsprechender Wahl der Lichtwellenlänge Beugungs- und Interferenzeffekte auf, die bei konventionellen optischen Geräten eine Messung verhindern, bei der Streulichtmessung bzw. Beugungsmessung jedoch explizit erfaßt und ausgewertet werden, da sie für die Strukturgrößen charakteristisch sind. Mit Hilfe aufwendiger Modellrechnungen ist es bereits möglich, verschiedene Strukturgrößen wie Linienbreite, Kantenschräge oder Linienhöhe durch Streulichtmessung zu bestimmen.
- Die Reflexion kohärenten Lichts an periodischen Strukturen, die als Amplituden oder Phasengitter aufgefaßt werden können, bewirkt die Bildung von Beugungs- und Interferenzeffekten. Ist die Wellenlänge des verwendeten Lichts zumindest größer als die halbe Gitterperiode, so entstehen neben dem direkt reflektierten Strahl 0-ter Ordnung noch weitere Beugungsmaxima höherer Ordnung. Die Lage bzw. der Winkel  $\theta_n$  der  $n$ -ten

Beugungsordnung hängt nur vom Einstrahlwinkel  $\theta_i$ , von der Gitterperiode  $g$  sowie von der Wellenlänge ab:

$$\sin\theta_i + \sin\theta_n = n \frac{\lambda}{g}$$

Im Fall von zweidimensionalen Gittern und komplizierten Strukturen mit mehreren

5 verschiedenen Perioden muß das Beugungsproblem dreidimensional analysiert werden.

Liegt die Größe der untersuchten Strukturen im Bereich der Wellenlänge, so gelten die

einfachen Fraunhofer Beugungsgleichungen nicht mehr. Statt dessen müssen die Maxwellgleichungen für die Reflexion und Transmission an Gittern explizit gelöst werden, z.B. mit Hilfe der sogenannten *rigorous coupled wave analysis*. Die auftretenden

10 Nichtlinearitäten lassen allgemein gültige Aussagen nur noch sehr begrenzt zu, weshalb für die Beurteilung von Beugungseffekten an kleinen Strukturen stets der konkrete Einzelfall betrachtet bzw. numerisch berechnet werden muß. Die Intensitäten sowie die Phasen der Beugeordnungen hängen dabei von den Eigenschaften des einfallenden Strahls (Winkel, Polarisation, Wellenlänge), von der untersuchten Gitterstruktur (Gitterperioden, Linienbreite,

15 Linienhöhe, Schichtaufbau, Kantenrundungen, Rauigkeit) und von den Materialeigenschaften des Substrats (Brechungsindex, Absorptionsindex) ab. Die Lage der Beugemaxima wird jedoch nur vom Einfallswinkel, von der Gitterperiode und von der Wellenlänge beeinflusst. Sind diese Größen konstant, so kann aus der Intensitätsauswertung der örtlich festen Beugeordnungen auf die übrigen Gitterparameter geschlossen werden.

20 Wegen der vielen Gitter-Einflußgrößen ist eine eindeutige Bestimmung der Gitterparameter jedoch nur möglich, falls eine genügende Anzahl von Intensitätsmeßwerten für den untersuchten Meßpunkt zur Verfügung steht.

### Gelöste Aufgabe

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein kostengünstiges und nicht zerstörend arbeitendes Verfahren und eine Vorrichtung zur optischen Kontrolle von

- 5 Fertigungsprozessen feinstrukturierter Oberflächen in der Halbleiterfertigung bereitzustellen. Der Einsatz des Verfahrens soll die Gerätekosten erheblich senken, den in situ- bzw. In-line-Einsatz ermöglichen und die Messung sowie die Meßdatenauswertung erheblich beschleunigen.

### 10 Beschreibung

Gemäß der vorliegenden Erfindung wird die Aufgabe durch die Merkmale des Anspruches 1 gelöst. Darüber hinaus wird in Anspruch 11 eine Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens vorgeschlagen.

15

Die bevorzugten Ausführungsformen sind Gegenstand der abhängigen Ansprüche.

20

Erfindungsgemäß wird die Klassifikation zur Kontrolle der Halbleiterfertigung während der Produktion wie folgt vorgenommen. In einem Vorlauf wird eine genügend große Anzahl der zu untersuchenden Strukturen (Prototypen mit typischen Produktionsabweichungen) z.B. mit dem im Weiteren vorgeschlagenen Meßgerät vermessen und somit Beugungs-/ und/oder Streulichtbilder (Signatures) aufgenommen. Man erhält so eine Anzahl von Referenzsignaturen. Darüber hinaus werden die Proben mit einem Meßgerät, gemäß dem Stand der Technik untersucht, das absolute Meßwerte liefert (z. B. Elektronenmikroskop).

25

Somit erhält man eine Datenbasis welche die Klassifikation der Referenzsignaturen enthält und die eine Zuordnung von fehlerhaften Teilen zu den Beugungs-/Streulichtbildern der Oberflächen von Proben aus der Produktion (Meßsignaturen) ermöglichen. Anhand dieser Datenbasis kann nun z.B. ein neuronales Netz trainiert werden und in Zukunft selbst eine gut/schlecht Einteilung vornehmen. Die Messungen mit dem Elektronenmikroskop können

30

dann entfallen. Es sind auch feinere Einteilungen in mehrere Klassen (z. B. Richtung der

Abweichungen) durchführbar. Darüber hinaus sind Auswirkungen von Abweichungen verschiedener Parameter separierbar und ebenfalls in das Klassifikationsmodell integrierbar (die Datenbasis muß dafür nur groß genug sein, z. B. einige 100 Proben). Mit diesem Verfahren können Proben untersucht werden, die sich aufgrund ihrer Komplexität einer Modellierung verschließen. Gerade dies gilt für typische Produktstrukturen in der Halbleiterfertigung (z. B. bei einem DRAM). Im Falle des Modellierungsverfahrens gemäß dem Stand der Technik müßten unter Umständen spezielle Teststrukturen verwendet werden, die eine Simulation von Parametervariationen erlauben. Dies bedeutet erheblichen zusätzlichen Aufwand in einer Fertigung und kann den Einsatz des Meßverfahrens ausschließen.

Für jeden Strukturtyp / für jedes Produkt einer Halbleiterfabrik muß dieses Einlernen durch Vermessung von Prototypen durchgeführt werden. Übertragungen von einem Produkt zum anderen sind nicht möglich. Innerhalb eines Produkttyps sind Parameterabweichungen dann detektierbar. Das gleiche gilt im übrigen auch für den Modellierungsansatz gemäß dem Stand der Technik.

Eine weitere interessante Applikation (der Streulichtmessung /Beugungsmessung) ist die Produkterkennung. Naturgemäß unterscheiden sich die Meßsignaturen von einem zum anderen Produkt in der Regel erheblich und eindeutig. Damit wird die Erkennung von Produkten (unterschiedlichen Halbleiterstrukturen) sehr kostengünstig möglich und man kann auf aufwendige Bilderkennung oder Schrifterkennung verzichten bzw. diese ersetzen.

Damit verbunden ist ein weiteres Problem in Halbleiterfabriken. Im Falle von fehlgeleiteten Wafern läßt sich nur mit relativ großem Aufwand feststellen, welcher Fertigungsschritt (z. B. ein kleiner Ätzschritt) zuletzt durchgeführt wurde und in welchem Zustand sich die Wafer jetzt befinden. Durch eine Streulicht/Beugungsmessung könnte diese Einordnung in Sekundenbruchteilen getroffen werden, falls einmal vorab die Beugungssignaturen nach jedem Fertigungsschritt aufgenommen und gespeichert wurden. Ein Vergleich (z.B. mit Tabelle, Neuronales Netzwerk) erbringt dann die Zuordnung.

Diese Produkterkennung / Prozeßschrittzuordnung kann mit der Beugungsanalyse nicht nur bei periodischen Strukturen angewendet werden. Auch bei allgemeinen nichtperiodischen (Logik-)Strukturen können charakteristische Intensitätsverläufe auftreten und eine

Klassifizierung ermöglichen. Diese Erweiterung auf nichtperiodische Strukturen ist auch für die Klassifizierung von Parameterabweichungen möglich.

Erfindungsgemäß wird vorgeschlagen, die Intensitätskurven von Beugungsbildern mit den  
5 Intensitätsverteilungen zu vergleichen, die zuvor mit spezifizierten, optimalen  
Gitterstrukturen und/oder Produktionsprototypen aufgenommen wurden und durch ein  
geeignetes Abstandsmaß zu entscheiden, ob die konkret untersuchte Struktur die  
geforderten Spezifikationen einhält.

Für diese Klassifikation (z.B. Struktur in Ordnung / Prozeß fehlerhaft) ist keine aufwendige  
10 Modellbildung oder die Bestimmung absoluter Gittergrößen erforderlich. Statt dessen  
werden die Intensitätskurven von Proben, die die Spezifikationen erfüllen (Prototypen) mit  
Hilfe eines lernfähigen Systems gespeichert und ein Vergleich mit der aktuellen Meßkurve  
durchgeführt. Das beschriebene Verfahren eignet sich speziell für die kontinuierliche  
Kontrolle von regulären Strukturen, z. B. von Speicherelementen, die zum größten Teil  
15 symmetrische Gitterstrukturen aufweisen. Während die bisherigen Verfahren mit  
numerischen Simulationen hauptsächlich für einfache Teststrukturen geeignet sind, ist das  
hier vorgeschlagene Konzept direkt auch für komplexe Produktstrukturen anwendbar. Beim  
Hochfahren der Fertigungslinie fallen genügend Meßdaten aus REM-Untersuchungen für ein  
Training eines lernfähigen klassifizierenden Systems (z. B. eines neuronalen Netzes oder  
20 einer Fuzzy-Logik) an.

Zur Beurteilung der strukturierten Probenoberfläche werden die Intensitätsverläufe mit  
Kurvenverläufen spezifizierter Proben (Prototypen) verglichen. Mit Hilfe eines lernfähigen  
Systems, z. B. eines neuronalen Netzes, wird eine Einteilung oder Klassifizierung der  
betreffenden Probenoberfläche vorgenommen (z. B. gut/schlecht). Das neuronale Netz  
25 wurde dazu mit einer ausreichenden Anzahl von Beispielstrukturen (Prototypen) trainiert.  
Nachdem eine fehlerhafte Struktur erkannt wurde kann diese mit den aufwendigen  
Verfahren des Standes der Technik genau untersucht werden. Der große Vorteil dieses  
Verfahrens liegt in seiner Einfachheit. Es ist kein hochqualifizierter Fachmann erforderlich,



dessen Aufgabe darin besteht, die Probenoberfläche so genau wie möglich zu modellieren und die Streulicht- und Beugungseffekte vorherzusagen, um einen absoluten Meßwert für einen oder mehrere Gitterparameter zu erhalten. Statt dessen gewinnt man sehr schnell und einfach die für die Fertigung wichtige Aussage gut/schlecht oder zumindest eine

- 5 Warnmeldung. Damit wird das Verfahren auch für Gitterstrukturen effizient anwendbar, die mehrere Periodizitäten in verschiedene Raumrichtungen besitzen (2D-Gitter) und durch Kantenrundungen, Rauigkeiten oder unbekannte Materialeigenschaften schwierig zu modellieren sind. Natürlich können aber auch wie bei ähnlichen Meßverfahren (oder z. B. bei der Ellipsometrie) durch Simulation und Regression der Modellparameter absolute
- 10 Meßergebnisse mit dem im Weiteren vorgestellten Meßgerät ermittelt werden.

Eine unbeabsichtigte Verkipfung der Probe während der Messung stellt eine Änderung des Lichteinfallswinkels dar und führt u. U. zu deutlichen Abweichungen in den Intensitätskurven.

- In den aus realen Versuchen stammenden Trainingsdaten für ein klassifizierendes neuronales Netzwerk sind solche zufälligen Verkipfungen ebenfalls enthalten, so daß das
- 15 System solche Effekte automatisch berücksichtigt und der konstruktive Aufwand zur Vermeidung und Erkennung solcher Verkipfungen relativ klein gehalten werden kann. Darüber hinaus können die Intensitäten der Beugungsmaxima höherer Ordnung auch für eine korrekte Ausrichtung der Scheibe verwendet werden. Im allgemeinen Fall besitzen die Beugeordnungen rechts und links der direkten Reflexion unterschiedliche Intensität, falls der
- 20 die Periodizität der Strukturen beschreibende Gittervektor nicht in der Einfallsebene des Lichtstrahls liegt bzw. die Probe verdreht ist. Man erhält somit ein sehr einfaches und empfindliches Mittel, um eine Verdrehung der Scheibe festzustellen, die sich auf die zu messenden Intensitätsverläufe auswirkt und somit das Meßergebnis für die Strukturgrößen verfälschen kann.

- 25 Als besonders großer Vorteile des Verfahrens muß hervorgehoben werden, daß verfahrensgemäß keine Modellbildung erforderlich ist, die eine Rückrechnung vom gemessenen Intensitätsverlauf bei einer Probe auf absolute Strukturgrößen dieser Probe gestattet. Für diese Rückrechnung existieren für Strukturen im Allgemeinen keine analytischen Ansätze. Statt dessen müssen vorab möglichst viele denkbare

Parameterkombinationen simuliert und die sich ergebenden Intensitätskurven z. B. in eine Tabelle eingetragen werden. Die Rückrechnung besteht dann im wesentlichen aus einem Vergleich der Tabellenkurven mit der aktuell gemessenen Kurve. Bei komplexen Gitterstrukturen können diese Vorab-Simulationen sehr umfangreich/aufwendig werden und

5 Tage oder Wochen dauern.

Für die Prozeßkontrolle wichtig ist jedoch im wesentlichen eine Kontrolle der Spezifikationen mit der Aussage in Ordnung/ nicht in Ordnung (gegebenenfalls noch eine Information über die Richtung einer Abweichung). Die Idee ist daher, nur eine derartige Klassifikation durchzuführen. Dazu muß lediglich eine möglichst eindeutige Signatur für die zu

10 überwachenden Parameter gemessen werden. Dabei muß sichergestellt sein, daß bestimmte Signaturen unverwechselbar bestimmte Oberflächenstrukturen indizieren. Diese Signaturen können z.B. sein:

- die Intensitäten der Beugeordnungen bei variabler Polarisierung des Meßstrahls
- die Intensitäten der Beugeordnungen (oder nur des direkten Reflexes) bei Änderung des

15 Einfallswinkels des Meßstrahls

- Meßwerte  $\psi/\delta$  eines Ellipsometers (wobei ggf. eine Parameter wie Polarisierung, Wellenlänge, Einfallswinkel geändert wird, um mehr Informationen über die Struktur und somit eine möglichst eindeutige Signatur zu erhalten)

- Messungen mit Spektroskopie / Reflektometrie / Thermowellenanalyse /

20 Röntgenspektroskopie: die damit erhältlichen Meßwerte hängen von den Strukturparametern (Linienbreite/Schichtdicke usw.) auf komplexe Weise ab. Absolute Strukturgrößen sind damit nur schwer bestimmbar, eine bloße Unterscheidung zwischen unterschiedlichen Strukturen ist jedoch möglich.

Unabhängig vom eigentlichen Meßprinzip ist die Grundlage des Verfahrens die Erzeugung

25 von Meßsignaturen, die eindeutig verschiedenen Gitterparametern zugeordnet werden können.

Im Folgenden wird ein Meßaufbau zur Erzeugung polarisationsabhängiger Signaturen beschrieben. Eine Lichtquelle liefert kohärentes, linear polarisiertes Licht einer Wellenlänge.

Alternativ kann unpolarisiertes Licht durch entsprechende Polarisatoren linear polarisiert werden. Zudem können mehrere Strahlen verschiedener Wellenlänge zu einem Strahl zusammengeführt werden, um eine größere Anzahl an Beugemaxima zu erhalten. Das kohärente Licht kann auch aus einer spektralen Lichtquelle stammen (z. B. einer Xenon-

- 5 Lampe), wobei mit Hilfe eines Filters verschiedene Wellenlängenbereiche extrahiert werden. Die im weiteren beschriebene Auswertung der von der Oberfläche reflektierten Lichtintensität kann damit zudem in Abhängigkeit der Wellenlänge durchgeführt werden. Mit Hilfe des zusätzlichen Parameters kann die Meßgenauigkeit und die Empfindlichkeit des Verfahrens erhöht werden.

- 10 Durch ein geeignetes optisches Element (z. B. eine  $\lambda/2$ -Platte) wird der Polarisationswinkel während der Messung stufenlos oder in kleinen Stufen (motorisch) geändert. Alternativ kann auch ein elektrooptisches Element zur Polarisationsdrehung eingesetzt werden oder die linear polarisierte Lichtquelle (der Laser) wird selbst gedreht. Die Strahlführung erfolgt mit Hilfe von Linsen, Spiegeln und Prismen, wobei deren genaue Anordnung nichts am
- 15 zugrunde liegenden Meßprinzip ändert. Allerdings müssen die Einflüsse der optischen Elemente auf den Polarisationswinkel des einfallenden Lichtsstrahls berücksichtigt werden. Die Spiegel, Prismen oder Scheiben können in beliebiger Reihenfolge zwischen Lichtquelle,  $\lambda/2$ -Platte und der zu untersuchenden Probe angebracht sein. Entscheidend ist, daß ein linear polarisierter Lichtstrahl auf die Probenoberfläche trifft, dessen Polarisationswinkel
- 20 zwischen  $0^\circ$  und  $180^\circ$  variiert wird. Alternativ kann auch ein anderer Winkelbereich zwischen  $0^\circ$  und  $360^\circ$  gewählt werden. Allerdings ergeben Winkel über  $180^\circ$  keine grundsätzlich neue Information, sondern stellen eine Wiederholung der Messung zwischen  $0^\circ$  und  $180^\circ$  dar. Das Meßverfahren kann auch mit elliptisch polarisiertem Licht durchgeführt werden. Wie im linearen Fall wird mit einer  $\lambda/2$ -Platte der Azimutwinkel (Polarisationswinkel) vorgegeben, der
- 25 die Hauptachse des elliptisch polarisierten Lichts bestimmt. Wiederum mit Hilfe eines geeigneten optischen Elements (z. B. eine  $\lambda/4$ -Platte) entsteht aus linear polarisiertem Licht die jeweils geforderte elliptische Polarisation. Um das Rauschen der Lichtquelle zu berücksichtigen wird z. B. mit einer Photodiode die Intensität eines mit einem Strahlteiler (z. B. Prisma oder Strahlplatte) ausgekoppelten Referenzstrahls gemessen. Mit Hilfe einer

verstellbaren, während der Messung aber festen Strahlumlenkung wird ein für die jeweilige Probe geeigneter Einfallswinkel realisiert (s. o. zu Strahlführung). Dieser konstante Einfallswinkel des Lichtstrahls auf die Probe stellt einen wichtigen Unterschied zu bisher vorgestellten ähnlichen Meßgeräten dar und vereinfacht den Meßaufbau erheblich.

- 5 Bei einem Durchmesser von ca. 0,5 mm trifft der Lichtstrahl i.a. auf mehrere tausend Einzelstrukturen, so daß das Meßergebnis einen Mittelwert der betreffenden Gitterparameter darstellt. Falls gewünscht, kann der Lichtstrahl mit Hilfe einer Optik aufgeweitet werden, um die Zahl der gleichzeitig betrachteten Einzelstrukturen zu erhöhen. Dabei dürfen auch nichtperiodische Strukturen erfaßt werden. Im Fall größtenteils nichtperiodischer Strukturen erhält man mit dem Meßverfahren eine Aussage über die Rauigkeit bzw. die mittlere Oberflächenbeschaffenheit der Probe. Der Lichtstahl kann auch fokussiert werden, um nur wenige Einzelstrukturen zu bedecken, falls der Bereich periodischer Strukturen klein ist oder weil die Eigenschaften speziell dieser Einzelstrukturen interessieren. Mit Hilfe eines Verfahrtes können verschiedene Meßpunkte auf einer größeren Probenoberfläche angefahren werden (mapping). Alternativ kann auch die Meßeinheit verfahren und positioniert werden.

- 15 Die Gittergrößen bestimmen die vom Reflexionspunkt ausgehende Lichtverteilung. Im einfachsten Fall wird mit einer Photodiode nur die Intensität des direkt reflektierten Strahls in Abhängigkeit vom Polarisationswinkel gemessen. Als Variation kann der reflektierte Strahl wiederum durch einen veränderbaren Polarisator (Analysator) bei bestimmten Polarisationswinkeln untersucht werden. Wie beim einfallenden Lichtstrahl können Spiegel und Prismen zur Strahlführung und Strahlumlenkung eingesetzt werden ohne das Meßprinzip zu beeinflussen. Falls höhere Beugungsordnungen auftreten, können sie ebenfalls mit justierbaren Photodioden gemessen werden. Man erhält pro Meßpunkt einen oder mehrere Kurvenverläufe, die zur Klassifizierung oder auch zur absoluten Bestimmung eines Gitterparameters herangezogen werden. Gitterparameter sind dabei Gitterperioden, Linienbreiten, Grabentiefen, Schichtdicken (auch transparente Mehrschichtsysteme), Seitenwandschrägen, Kantenrundungen und Oberflächenrauigkeiten und Materialeigenschaften (z.B. Brechungsindex). Die Probenoberfläche kann von Metallen (z.

B. Aluminium), Halbleitern (Poly-Silizium) oder Nichtmetallen (z. B. Lacken) bedeckt sein. Der Anwendungsbereich des Meßprinzips bzw. die mögliche Größe der feinen Oberflächenstrukturen hängt von der Wellenlänge der verwendeten elektromagnetischen Strahlung ab: Die Strukturgrößen sollten in der Größenordnung mit der Wellenlänge  
5 übereinstimmen.

Im übrigen können auch orts aufgelöste Meßsysteme, z.B. eine CCD-Kamera (evtl. mit einem dazwischen liegenden Schirm) für die Intensitätserfassung eingesetzt werden. Aufgrund seines einfachen Aufbaus mit feststehenden Komponenten und der Auswertung eines nur sehr kleinen Streulichtwinkels, eignet sich der vorgeschlagene Aufbau im  
10 Gegensatz zu den bisher vorgeschlagenen Linienbreiten-Meßanordnungen für die Integration als *in situ* bzw. in-line Gerät.

Während in der bekannten Streulichtmessung bei konstanter Polarisierung der Lichtquelle der Einfallswinkel oder der gemessene Ausfallswinkel mit aufwendigen Meßanordnungen variiert werden, wird hier die kontinuierliche Drehung der linearen Polarisierung vorgeschlagen, um  
15 die Meßanordnung erheblich zu vereinfachen und den Meßvorgang zu beschleunigen. Als Meßergebnis erhält man Intensitätsverläufe der Beugeordnungen (im einfachsten Fall nur der 0-ten Beugeordnung) in Abhängigkeit des Polarisierungswinkels zwischen  $0^\circ$  und  $180^\circ$ . Der die Richtung der Periodizität angegebende Gittervektor darf dazu nicht in der Einfallsebene des Lichtsstrahls liegen, damit konische Beugung auftritt.

20 Die Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens ist jedoch nicht auf die Variation der Polarisierung des zur Messung verwendeten Lichtstrahles beschränkt. Ebenso gut eignet sich die Variation des Einfallswinkels (lotrechter und/oder azimuthaler Winkel) des Lichtstrahles auf die Probe zum Erzeugen unterschiedlicher Beugungsbilder. Eine Vorrichtung zur Variation des Einfallswinkels kann z.B. folgendermaßen aussehen.

25 Es kann die Messanordnung wie in DE 198 24 624 A1 verwendet werden. Der Strahlteiler wird aber durch einen elektrisch geregelt rotierenden Spiegel ersetzt. Der elektrisch geregelt rotierende Spiegel (sog. Galvanometer-Scanner) wird in Verbindung mit einer feststehenden, nicht-planaren Spiegeloberfläche verwendet, um den Einfallswinkel des Meßstrahls für eine  $2\theta$ -Beugungsanalyse eines festen Meßpunkts zu variieren. Eine solche

Anordnung ermöglicht das Anfahren großer Winkelstellungen innerhalb von Millisekunden mit einer Genauigkeit von wenigen  $\mu\text{rad}$ . Damit kann die Variation des Einfallswinkels innerhalb von einigen zehntel Sekunden durchgeführt werden. Darüber hinaus wird für die Erzeugung unterschiedlicher Einfallswinkel nur ein robustes bewegliches Bauteil

- 5 (Galvanometer-Scanner) benötigt und somit die Störanfälligkeit reduziert. Die Kosten der verwendeten Komponenten sowie der für den Meßaufbau erforderliche Raumbedarf sind vergleichsweise gering. Da die verschiedenen Einfallswinkel sequentiell erzeugt werden, existiert zu jedem Zeitpunkt genau ein einfallender Meßstrahl. Eine Überlagerung von Beugeordnungen tritt somit nicht auf.

- 10 Des weiteren wird vorgeschlagen, die Intensitäten der ersten Beugeordnung zur Überprüfung der exakten Ausrichtung der Probenscheibe einzusetzen.

Nur bei einem bestimmten Rotationswinkel der Scheibe auf dem Meßplatz besitzen die beiden Beugungsmaxima erster Ordnung bei konischer Beugung gleiche Intensität. Somit erhält man eine einfache Möglichkeit, den Rotationswinkel, der die Intensitätsverläufe

- 15 beeinflusst, exakt zu justieren. Die Intensitätsverläufe können konventionell mit Hilfe eines Modells zur Bestimmung absoluter Gittergrößen durch Parameterregression genutzt werden.

Die vorliegende Erfindung wird im Folgenden unter Bezugnahme auf die Zeichnungen beschreiben.

- 20 Fig. 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer Vorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens bei der die Polarisation des zur Messung verwendeten Lichtes variiert wird.

Fig. 2 stellt einen Auflaufplan des erfindungsgemäßen Verfahrens dar.

- Fig. 3 stellt einen Auflaufplan des Einsatzes des erfindungsgemäßen Verfahrens zur  
25 Produkterkennung dar.

Die in Fig. 1 dargestellte Vorrichtung zur Messung polarisationsabhängiger Signaturen verfügt über eine Lichtquelle (1), welche kohärentes, linear polarisiertes Licht einer Wellenlänge liefert. Alternativ kann unpolarisiertes Licht durch entsprechende Polarisatoren linear

polarisiert werden. Durch ein geeignetes optisches Element (2) (z. B. eine  $\lambda/2$ -Platte) wird der Polarisationswinkel während der Messung stufenlos oder in kleinen Stufen (motorisch) geändert. Alternativ kann auch ein elektrooptisches Element zur Polarisationsdrehung eingesetzt werden oder die linear polarisierte Lichtquelle (der Laser) wird selbst gedreht. Ein linear oder elliptisch polarisierter Lichtstrahl (3) trifft auf die Oberfläche der Probe (4), dessen Polarisationswinkel (Azimut) wird bevorzugt zwischen  $0^\circ$  und  $180^\circ$  variiert. Alternativ kann auch ein anderer Winkelbereich zwischen  $0^\circ$  und  $360^\circ$  gewählt werden oder die Messung mit anderen Winkeln wiederholt werden, um die Meßgenauigkeit zu erhöhen. Um das Rauschen der Lichtquelle zu berücksichtigen wird z. B. mit einer Photodiode (6) die Intensität eines mit einem Strahlteiler (5) (z. B. Prisma oder Strahlplatte) ausgekoppelten Referenzstrahls (7) gemessen. Mit Hilfe einer verstellbaren, während der Messung aber festen Strahlumlenkung (8) wird ein für die jeweilige Probe (4) geeigneter Einfallswinkel gewählt. Dieser konstante Einfallswinkel des Lichtstrahls auf die Probe stellt einen wichtigen Unterschied zu bisher vorgestellten ähnlichen Meßgeräten dar und vereinfacht den Meßaufbau erheblich.

Mit Hilfe eines Verfahrtes (10) können verschiedene Meßpunkte auf einer größeren Probenoberfläche angefahren werden.

Die Gittergrößen bestimmen die vom Reflexionspunkt ausgehende Lichtverteilung. Im einfachsten Fall wird mit einer Photodiode (12) nur die Intensität des direkt reflektierten Strahls (Spiegelreflex) (11) in Abhängigkeit vom Polarisationswinkel gemessen. Falls höhere Beugungsordnungen auftreten (Nebenreflexe (13)), können sie ebenfalls mit justierbaren Photodioden (14) oder mit einer CCD-Kamera gemessen werden.

Die Auswertung der Meßdaten und die Steuerung des Systems erfolgen mit einem an die einzelnen Vorrichtungsteile angeschlossenen Rechnersystem, welches ebenfalls das Klassifikationsmodul, bevorzugt das lernfähige System, bestehend aus einem neuronalen Netzwerk beinhaltet. Wird gemäß dem Stand der Technik ein physikalisches Modell für die Simulation der Beugungseffekte verwendet, so können die mit der Anordnung gemessenen Intensitätskurven auch zur Berechnung absoluter Probandaten, insbesondere Profilparameter verwendet werden.

In Fig. 2 wird das erfindungsgemäße Verfahren durch einen Ablaufplan dargestellt.

In einem Vorlauf (100) (Einlernen des Systems) wird eine genügend große Anzahl der zu untersuchenden Strukturen (Prototypen mit typischen Produktionsabweichungen) vermessen und somit Beugungs-/ und/oder Streulichtbilder (Signaturen) aufgenommen (101). Man erhält  
5 so eine Anzahl von Reverenzsignaturen (103). Darüber hinaus werden die Proben mit einem Meßgerät, gemäß dem Stand der Technik untersucht (102), das absolute Meßwerte liefert (104)(z. B. Elektronenmikroskop). Die Referenzsignaturen können so den absoluten Meßwerten dieser Proben (Produktionsprototypen) zugeordnet werden. Somit erhält man eine Datenbasis,  
10 die eine Zuordnung von fehlerhaften Teilen zu den Beugungs-/Streulichtbildern der Oberflächen von Proben aus der Produktion (Meßsignaturen) ermöglichen. Anhand dieser Datenbasis kann nun z.B. ein neuronales Netz trainiert werden (105) und in Zukunft selbst eine gut/schlecht Einteilung vornehmen. Während des Produktionsprozesses (200) werden die gemessenen Intensitätskurven von Signaturen der Produktproben (201) mit den Intensitätsverteilungen  
15 verglichen, die zuvor mit spezifizierten, optimalen Gitterstrukturen und/oder Produktionsprototypen aufgenommen wurden und durch ein geeignetes Abstandsmaß entschieden, ob die konkret untersuchte Struktur die geforderten Spezifikationen einhält (202). Nach der Klassifizierung der Probe, z.B. der Einteilung gut/schlecht oder der Zuordnung zu Meßwertbereichen kann nach der Ergebnisausgabe (203) eine genaue  
20 Fehleruntersuchung mit absoluten Meßgeräten gemäß dem Stand der Technik durchgeführt werden (204). Diese Fehleranalyse kann zu einer Korrektur des Herstellungsprozesses führen (205).

In Fig. 3 wird der Einsatz des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Produkterkennung durch  
25 einen Ablaufplan dargestellt.

In einem Vorlauf (100) (Einlernen des Systems) wird eine genügend große Anzahl der zu untersuchenden Strukturen (Verschiedene Produkttypen in verschiedenen Fertigungsstadien und/oder mit verschiedenen Produktionsfehlern) vermessen und somit Beugungs-/ und/oder Streulichtbilder (Signaturen) aufgenommen (101). Man erhält so eine Anzahl von



- Reverenzsignaturen (103). Anhand dieser Datenbasis kann nun ein Klassifikationsmodul erstellt, z.B. ein neuronales Netz trainiert werden (105) und in Zukunft selbst eine Produkterkennung vornehmen. Während des Produktionsprozesses (200) werden die gemessenen Intensitätskurven von Signaturen der zu Klassifizierenden Produkttypen (201) mit den
- 5 Intensitätsverteilungen verglichen, die zuvor von den verschiedenen Produkttypen aufgenommen wurden und entschieden um welches Produkt es sich handelt und/oder ob die konkret untersuchte Struktur die geforderten Spezifikationen einhält und/oder welche Produktionsfehler auftreten (202). Nach der Klassifizierung des untersuchten Produkts kann, nach der Ergebnisausgabe (203), gegebenenfalls eine genaue Fehleruntersuchung mit
- 10 absoluten Meßgeräten gemäß dem Stand der Technik durchgeführt werden (204). Diese Fehleranalyse kann zu einer Korrektur des Herstellungsprozesses z.B der Korrektur von Fehlleitungen führen (205).

### Patentansprüche

1. Verfahren zur Kontrolle von Fertigungsprozessen feinstrukturierter Oberflächen in der Halbleiterfertigung, bestehend aus den folgenden Schritten
  - 5 – Bereitstellung von Referenzsignaturen feinstrukturierter Oberflächen
  - Messung von mindestens einer Signatur der zu kontrollierenden Probenoberfläche,
  - Vergleich der gemessenen Signatur mit den Referenzsignaturen
  - Klassifikation von Parametern der Probenoberfläche an Hand der Vergleichsergebnisse
- 10 **dadurch gekennzeichnet**, daß die Messung der Referenzsignaturen durch die Messung der Orts- und/oder Intensitätsverteilung von Beugungsbildern an qualitativ spezifizierten Produktionsprototypen durchgeführt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1 **dadurch gekennzeichnet**, daß die Signaturen optisch, durch die Messung von Beugung und/oder Streuung von elektromagnetischer Strahlung an den
- 15 feinstrukturierten Oberflächen, erzeugt werden.
3. Verfahren nach Anspruch 1 und/oder 2 **dadurch gekennzeichnet**, daß der Vergleich der Referenzsignaturen mit den Signaturen der Probenoberfläche und deren Klassifikation mit Hilfe eines mathematischen Algorithmus ausgeführt werden.
4. Verfahren nach Anspruch 3 **dadurch gekennzeichnet**, daß der mathematische Algorithmus ein lernfähiges neuronales Netzwerk und/oder eine Fuzzy-Logik umfaßt.
5. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 2 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Signaturen durch die Messung der Orts- und/oder Intensitätsverteilung von Beugungs- und/oder Streulichtbildern unter Variation der Polarisierung und/oder des Einfallswinkels der elektromagnetischen Strahlung erzeugt werden.
- 25 6. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Klassifikation der Probenoberfläche in einer Einteilung, gut oder schlecht und/oder einer Einteilung in feiner abgestufte Qualitätsklassen und/oder der Einordnung zu bestimmten Produktionsfehlern besteht.

7. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, daß das Verfahren zur Kontrolle der Produktion periodischer Speicherelementstrukturen und/oder nichtperiodischer Logikstrukturen eingesetzt wird.
8. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 2 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, daß das Erstellen des Klassifikationssystems mit den Meßdaten der Referenzsignaturen, welche bei dem Hochfahren der Fertigungslinie anfallen geschieht.
9. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, daß das Verfahren zur Produkterkennung oder zur Einordnung des Zustandes fehlgeleiteter Wafer oder zum korrekten Ausrichten von Waferscheiben eingesetzt wird.
10. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Klassifikationsergebnisse im Fehlerfalle als Anstoß zur Korrektur des Fertigungsprozesses genutzt werden.
11. Vorrichtung zur Kontrolle von Fertigungsprozessen feinstrukturierter Oberflächen in der Halbleiterfertigung, insbesondere zur Durchführung des Verfahrens nach den Ansprüchen 1 bis 10, bestehend aus
- einer Vorrichtung zur Bereitstellung von Referenzsignaturen feinstrukturierter Oberflächen
  - einer Vorrichtung zur Messung von mindestens einer Signatur der zu kontrollierenden Probenoberfläche,
  - einem Modul zum Vergleich der gemessenen Signatur mit den Referenzsignaturen
  - einem Modul zur Klassifikation von Parametern der Probenoberfläche an Hand der Vergleichsergebnisse
- dadurch gekennzeichnet**, daß die Messung der Referenzsignaturen durch die Messung der Orts- und/oder Intensitätsverteilung von Beugungsbildern an qualitativ spezifizierten Produktionsprototypen durchgeführt wird.
12. Vorrichtung nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Vorrichtung in die Halbleiterfertigungslinie integriert ist und eine in situ- und/oder in-line Produktionsüberwachung ermöglicht.

13. Vorrichtung nach den Ansprüchen 11 und/oder 12, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Vorrichtung zur Messung von Signaturen aus einer kohärenten elektromagnetischen Strahlungsquelle, einer Vorrichtung zur stufenlosen oder in kleinen Stufen erfolgenden Drehung der Polarisierung der elektromagnetischen Strahlung und mindestens einem elektromagnetischen Strahlungsdetektor besteht, wobei die kohärente elektromagnetische Strahlung in einem festen Einfallswinkel auf eine feinstrukturierte Probenoberfläche auftrifft und die Orts- und/oder Intensitätsverteilung des durch die Reflexion der Strahlung an der Oberfläche erzeugten Beugungsbildes mit dem/den Strahlungsdetektor/en in Abhängigkeit von der Polarisierung der Strahlung gemessen wird.
14. Vorrichtung nach einem oder mehreren der Ansprüche 11 bis 13, **dadurch gekennzeichnet**, daß die elektromagnetische Strahlung linear oder elliptisch polarisiert ist.
15. Vorrichtung nach einem oder mehreren der Ansprüche 11 bis 14, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Wellenlänge der elektromagnetischen Strahlung im Bereich der Strukturgrößen der Strukturen auf der feinstrukturierten Oberfläche ist.
16. Vorrichtung nach einem oder mehreren der Ansprüche 11 bis 15, **dadurch gekennzeichnet**, daß die elektromagnetische Strahlung mehrere Wellenlängen oder Wellenlängenbereiche umfaßt und die Messung entweder in Abhängigkeit von den Wellenlängen oder Wellenlängenbereichen nacheinander oder mit allen Wellenlängen oder Wellenlängenbereichen gleichzeitig erfolgt.
17. Vorrichtung nach Anspruch 16, **dadurch gekennzeichnet**, daß das kohärente Licht aus einer Spektrallampe stammt und die verschiedenen Wellenlängenbereiche mit einem Filter extrahiert werden.
18. Vorrichtung nach einem oder mehreren der Ansprüche 11 bis 17, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Vorrichtung zur stufenlosen oder in kleinen Stufen erfolgenden Drehung der Polarisierung der elektromagnetischen Strahlung aus einer  $\lambda/2$ -Platte oder zwei  $\lambda/4$ -Platten oder einem elektrooptischen Element oder einer Vorrichtung zur mechanischen Drehung der Lichtquelle selbst besteht.

19. Vorrichtung nach einem oder mehreren der Ansprüche 11 bis 18, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Polarisationsrichtung der Strahlung um einen Winkel von insgesamt 180 Grad gedreht wird.

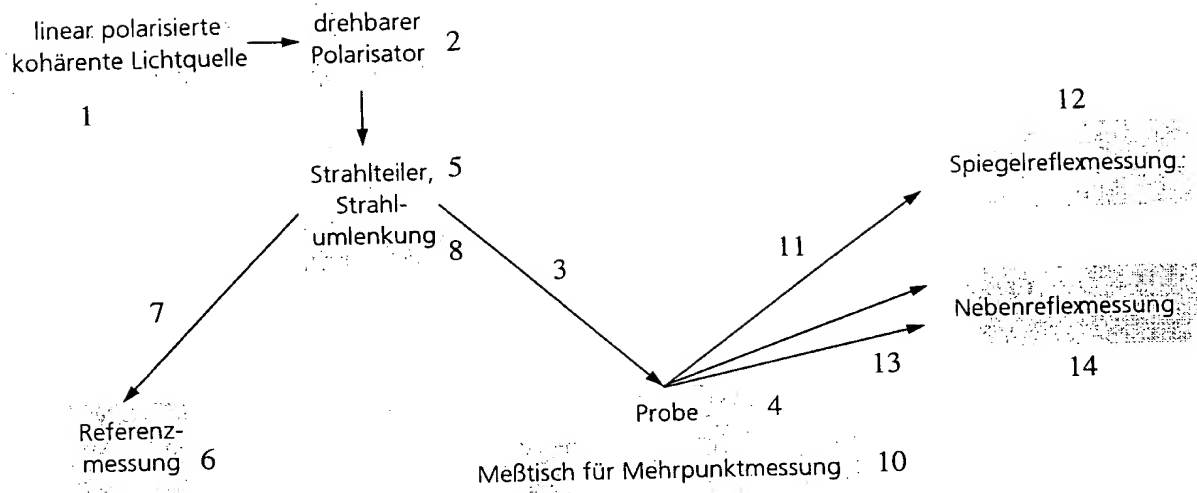
5 20. Vorrichtung nach einem oder mehreren der Ansprüche 11 bis 19, **dadurch gekennzeichnet**, daß mittels eines Strahlteilers und einer Strahlumlenkung ein Referenzstrahl aus dem auf die feinstrukturierte Oberfläche gerichteten Strahl ausgekoppelt wird und mit einem weiteren Strahlungsdetektor die Intensität dieses Referenzstrahls gemessen wird.

10 21. Vorrichtung nach einem oder mehreren der Ansprüche 11 bis 20, **dadurch gekennzeichnet**, daß der elektromagnetische Strahl bevor er auf die Probe trifft entweder aufgeweitet oder fokussiert wird.

15 22. Vorrichtung nach einem oder mehreren der Ansprüche 11 bis 21, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Probe mit der feinstrukturierten Oberfläche auf einem Verfahrtschisch fixiert ist oder die gesamte Meßeinrichtung gegenüber der Probe verfahren wird und Messungen von Orts- und/oder Intensitätsverteilungen von Beugungsbildern an verschiedenen Bereichen der Probenoberfläche durchgeführt werden.

20 23. Vorrichtung nach einem oder mehreren der Ansprüche 11 bis 22, **dadurch gekennzeichnet**, daß die von der feinstrukturierten Oberfläche reflektierte elektromagnetische Strahlung zusätzlich in Abhängigkeit ihrer Polarisation untersucht wird.

25 24. Vorrichtung nach einem oder mehreren der Ansprüche 11 bis 23, **dadurch gekennzeichnet**, daß aus den gemessenen Signaturen absolute Profilparameter bestimmt werden.

*Fig. 1:*

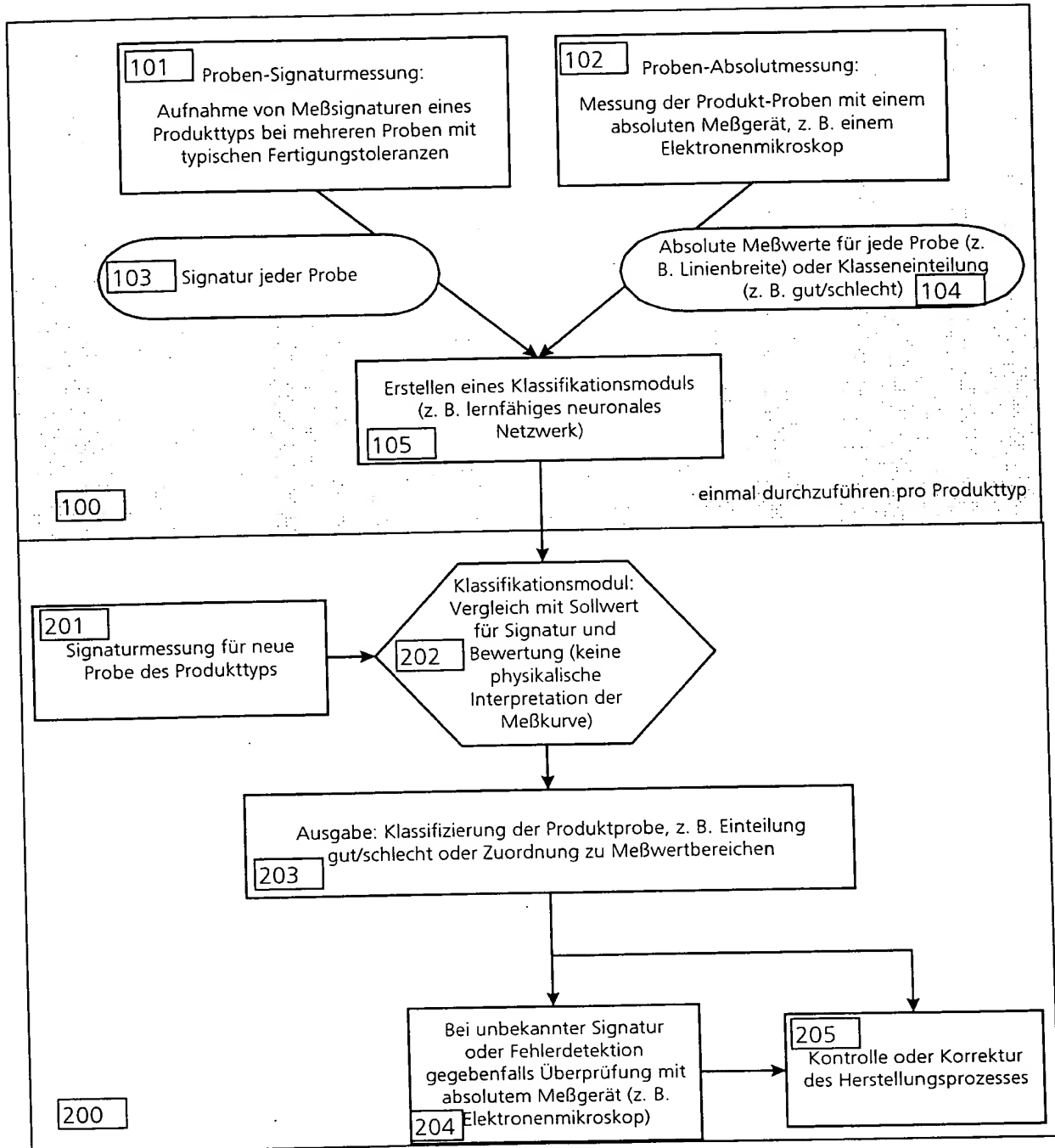


Fig. 2

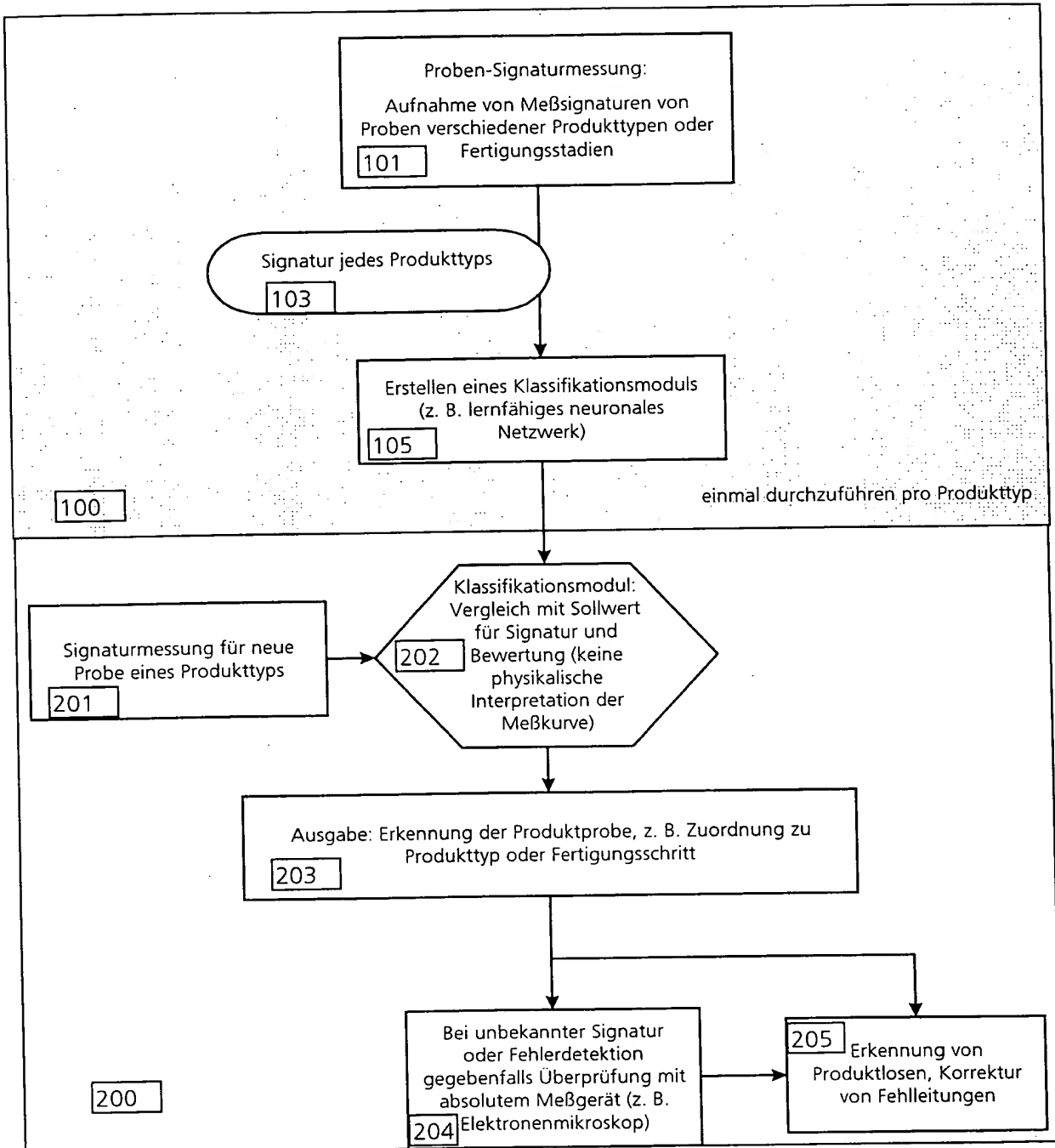


Fig. 3



### Zusammenfassung

Vorgeschlagen wird ein Verfahren zur Kontrolle von Fertigungsprozessen feinstrukturierter Oberflächen in der Halbleiterfertigung, bestehend aus den folgenden Schritten, Bereitstellung von Referenzsignaturen feinstrukturierter Oberflächen, Messung von

5 mindestens einer Signatur der zu kontrollierenden Probenoberfläche, Vergleich der gemessenen Signatur mit den Referenzsignaturen, Klassifikation von Parametern der Probenoberfläche an Hand der Vergleichsergebnisse dadurch gekennzeichnet, daß die Messung der Referenzsignaturen durch die Messung der Orts- und/oder

10 Intensitätsverteilung von Beugungsbildern an qualitativ spezifizierten Produktionsprototypen durchgeführt wird. Die Klassifikation erfolgt dabei bevorzugt mit einem lernfähigen neuronalen Netzwerk und/oder eine Fuzzy-Logik. Des weiteren wird eine Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens vorgeschlagen. Die Signaturen werden dabei durch Drehung der Polarisationssebene des auf die Probe auftreffenden Lichtstrahles erzeugt.